

고온용 히트파이프형 태양열 흡수기

부 준홍¹⁾, 정 의국²⁾

High-Temperature Heat-Pipe Type Solar Thermal Receiver

Joon Hong Boo, Eui Guk Jung

Key words : Solar thermal receiver(태양열 흡수기), High-temperature heat pipe(고온용 히트파이프), Thermal analysis(열해석)

Abstract : A numerical study was conducted on a simplified model of a high-temperature solar receiver which incorporates liquid-metal heat pipe. The objective of this paper is to compare the isothermal characteristics of the heat pipe receiver with the conventional receiver utilizing convection of molten salt as heat carrier. The solar receiver was assumed to be subject to a concentration ratio between 50 and 1,000 to supply high-temperature heat to a stirling engine for electric power generation. For simplicity of the analysis, a cylindrical geometry was assumed and typical dimensions were used based on available literature. The heat pipe had a shape of double-walled cavity and the working fluid was a sodium. The analysis was performed assuming that the radiation heat flux on the inner walls of the receiver was uniform, since the focus of this study was laid on the comparison of the conventional type and heat pipe type receiver. The results showed that the heat pipe type exhibited superior performance when the operating temperature becomes higher. In addition, to explore the advantage of the heat pipe receiver, the channel shape and dimensions should be adjusted to increase the heat transfer area between the wall and the heat transfer medium.

1. 서론

고온 범위에서 태양열을 이용하는 대표적인 경우로 태양열 발전과 태양열 화학반응로를 들 수 있다. 스티어링(Stirling) 엔진을 이용한 태양열 발전의 경우, 집광시설을 통해 집중된 고밀도의 태양열이 흡수기를 통해 스티어링 엔진에 공급된다. 국내에서의 이 분야의 연구 결과로는, 10 kW급 접시형 태양열발전시설이 개발되어 시범 운용되고 있으며, 향후에는 MW 단위의 고온태양열 발전을 위해 국제공동연구개발이 진행되고 있다. 한편, 고온의 태양열 화학반응로를 개발하여 신재생에너지를 통해 수소를 생산하는 연구도 진행되고 있다.

고온 태양열 흡수기에서는 가능한 열손실을 최소화 하고 등온으로 스티어링엔진의 헤드 부분에 열을 공급하는 것이 선호되며, 태양열 반응로의 경우에는 반응로 내부 공간 전체에 가능한 균일한 고온 환경을 형성하여 물질의 화학반응이나 개질을 효과적으로 하는 것이 필요하다. 선진국의 연구사례를 보면 이러한 목적을 위해서 고온 액체금속 히트파이프를 활용하고 있다. 본 연구에서는 고온 태양열 흡수기의 집열부의 열전달

구조를 분석하고, 액체금속 히트파이프를 적용한 경우의 특징적 성능 변화를 예측하여 기존의 방법과 비교하기 위해 기초적인 모델링과 수치해석 결과를 제시하고자 한다.

나트륨을 작동유체로 사용하는 히트파이프는 스테인리스 스티로 용기를 제작하는 경우에는 800℃까지, 그리고 인코넬 등의 합금으로 용기를 제작하는 경우에는 1500℃까지 고온 정상작동이 가능한 것으로 알려져 있으므로, 이러한 온도 범위에서 작동하는 흡수기 또는 반응로에 그 적용 가능성을 타진하는 연구의 필요성이 있다. 특히, 히트파이프의 특징적인 성능으로서 고속열전달과 등온성을 충분히 활용할 수 있는 여지가 있을 것으로 생각되며, 열매체의 순환을 위한 펌프와 그 소요동력을 배제할 수 있으므로, 운전상의 경제성과 내구성에도 이점이 있을 것이다.

1) 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail : jhboo@kau.ac.kr

Tel : (02)300-0107 Fax : (02)3158-2191

2) 한국항공대학교 대학원

E-mail : egjung@kau.ac.kr

Tel : (02)3159-9230 Fax : (02)3158-2191

2. 흡수기의 모델링

고온 태양열 흡수기에 가장 많이 사용되어 오 는 방식은 molten salt를 강제순환시켜 흡수기 내의 고밀도 열을 스텔링엔진 헤드부로 이동시키 는 방식이다. 흡수기의 형상은 cone 형태나 dome 형태 등 여러 가지가 있을 수 있지만 본 연구에서 는 우선 단순한 형태를 가지고 비교하기 위해 일 정한 단면을 갖는 실린더 형태의 흡수기를 고려 하였다. 또한 열매체의 열 이송 방식을 보면 코일 형태로 가열부와 열흡수부를 감싸서 열을 이동하 고 전달시키는 방식으로 되어 있다. 그러나 본 연 구에서는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 흡수기의 축 방향으로 평행하게 48개의 열매체 채널을 형성하 였으며, 흡수기 전방과 후방에서는 적절한 헤더 (header)에 의해 유량이 분포되고 펌프에 의해 압력이 공급될 수 있는 것을 가정하였다.

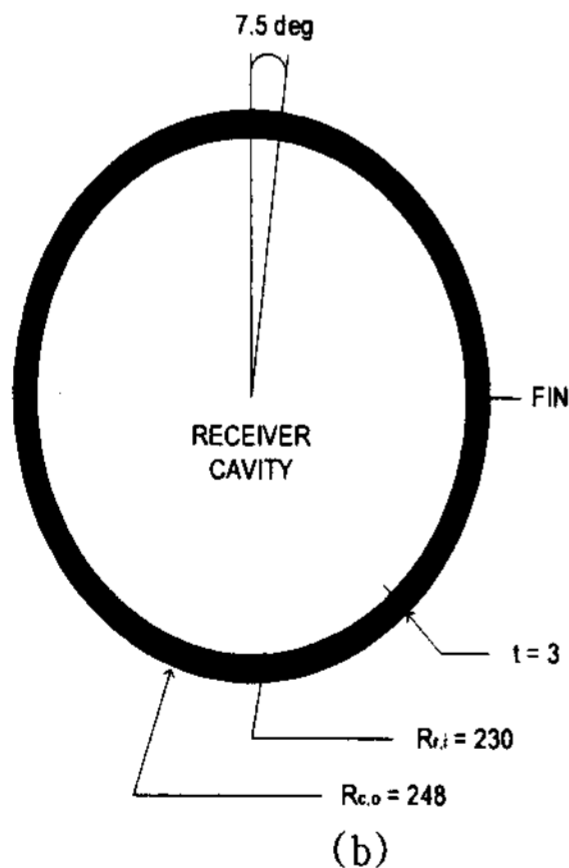
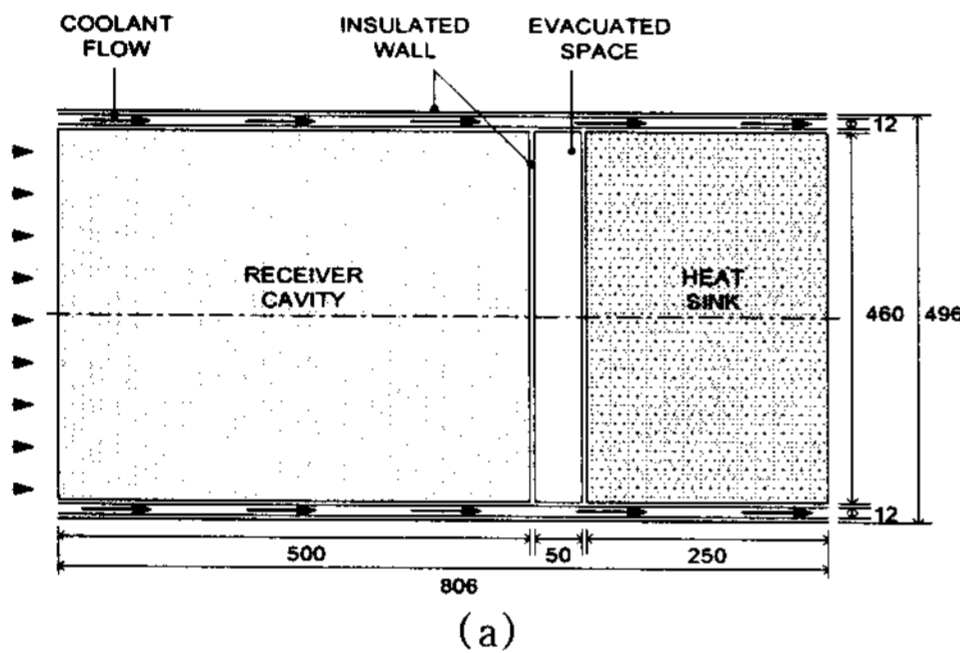


Fig. 1. High-temperature solar receiver model in this study: (a) side view, (b) front view

위의 그림에서 특징적인 수치들은 서태범 등 의 문헌에 제시된 것과 유사하게 가정하였다. 흡 수기는 내경 460 mm를 갖는 실린더형이며, 길이가 500 mm이다. Fig. 1. (a)에서 우측의 Heat Sink 로 표시된 공간은 실제로 스텔링 엔진의 헤드가 놓이는 위로 가정하였다. 히트싱크는 흡수기와

동일한 내경에 길이가 250 mm이다. Receiver cavity의 열은 외벽에서 열매체(molten salt)로 모두 흡수되어 대류에 의해 이송되는 것을 보장 하기 위해 흡수기 공간과 히트싱크 공간 사이 에 인위적으로 공간(evacuated space)를 배치하 여 직접적인 전도에 의한 열전달을 배제하였다. 1개의 열매체 이송 채널의 입체적 모양은 Fig. 2 에 나타난 바와 같으며, 채널의 내부 공간의 높 이는 12 mm로 하였다. 히트파이프식의 경우는 열 매체가 흐르는 공간을 축방향 히트파이프로 대체 할 경우를 가정하였다.

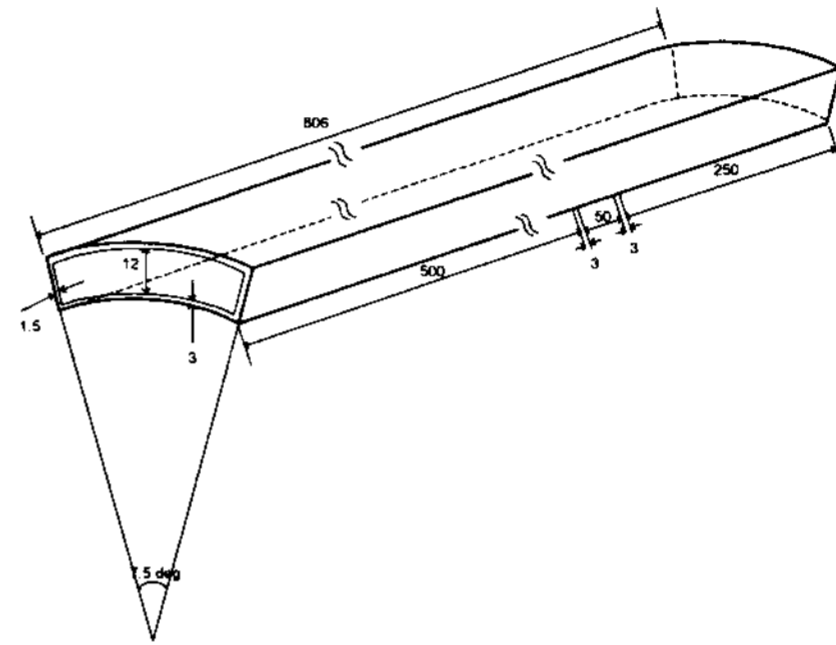


Fig. 2. Coolant(molten salt) channel

3. 수치해석

고온 태양열 흡수기 내부의 성능 해석을 위하 서는 복사 열전달 해석이 필수적이다. 그러나 본 연구의 목적은 강제대류식 열이송과 히트파이프 식 열이송의 성능을 비교하는 것에 초점을 두고 있으므로, Fig. 1(a)의 좌측 흡수기 입구로 들어 오는 복사열은 흡수기 내부 표면(흡수율 및 방사 율은 모두 0.97로 가정)에 균일하게 분포된 후에 외벽의 열매체로 전달된다고 가정하였다. 이 경 우에는 흡수기 내벽의 경계조건을 일정 열유속으 로 단순화 할 수 있다. 또한, 히트싱크의 내벽에 서는 흡수기 내벽에 가해진 열량이 모두 히트싱 크에서 배출될 수 있도록 일정 열유속 경계조건 을 설정하였다. 축대칭성을 이용하여, 본 연구에 서 수치해석은 Fig. 2에 보이는 1개의 채널에 대 해서만 수행하였다.

성능해석을 위한 입력조건은 강제순환식인 경 우에 냉각원 입구의 온도, 질량유량 조건 및 입력 열유속이다. 흡수기 입구의 복사열유속은 문헌에 따라 지표면 직달 태양조사량 800 W/m^2 를 집광비 의 값과 곱하여 산정하였으며, 집광비의 값은 1000 이내(54, 200, 500, 1000)로 하였다.

히트파이프식 흡수기 모델에 대한 해석에서 는, 히트파이프의 열이송 특성을 나타낼 수 있도 록 실험적으로 알려진 유효열전도도를 갖는 고체 물질이 냉각채널 내부 영역을 채우고 있는 것으 로 고려하였다. 고온 액체금속 히트파이프의 유효 열전도율은 문헌의 실험치를 준용하여 3,000로 부터 100,000 W/m-K 범위의 값으로 하였다.

본 연구에서 설정한 모델에 대한 수치해석에 는 상용 코드인 Fluent(version 6.2)를 사용하였

으며, 열매체인 molten salt의 물성치는 600℃에서 $\text{NaNO}_3\text{KNO}_3$ 의 것을 사용하였다.

4. 결과 및 토론

용융염 강제순환식 흡수기 성능

태양열 흡수기의 열손실을 해석한 서태범 등의 문헌에서 대표적으로 유사한 크기의 흡수기가 받는 열전달률은 손실을 제외하고 약 7.14 kW가 되는데, 이는 본 연구에서의 모델의 흡수기 입구 면적을 고려하면 집광비가 54의 경우에 해당한다. 이 집광비에서 molten salt를 열매체로 이용하는 흡수기에서 질량유량을 0.01 kg/s, 입구 열매체 온도를 450K로 했을 경우, 수치해석 결과 모델의 온도분포는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

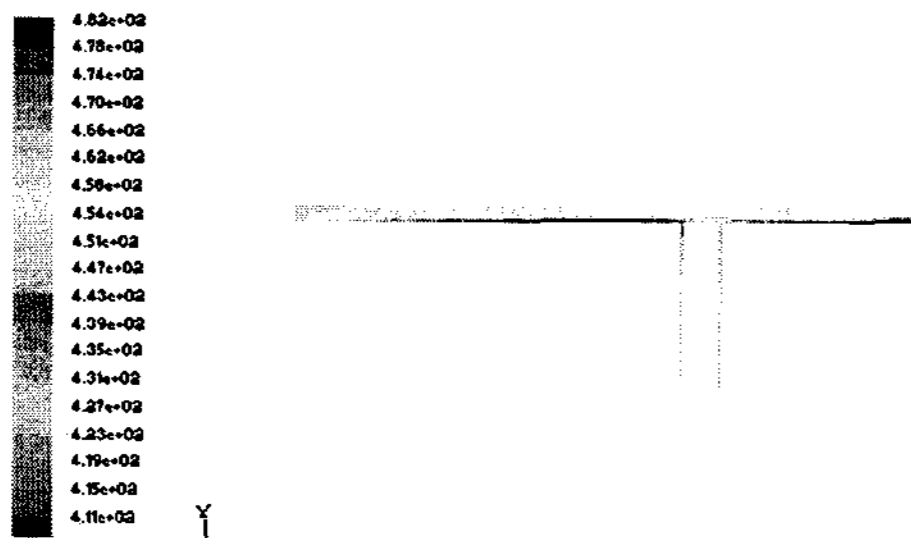


Fig.3. Convection type receiver. Concentration ratio 54, mass flow 0.01 kg/s, inlet temp 450K.

집광비 200 및 500에서의 해석 결과는 각각 Fig. 4와 5에 나타난 바와 같다.

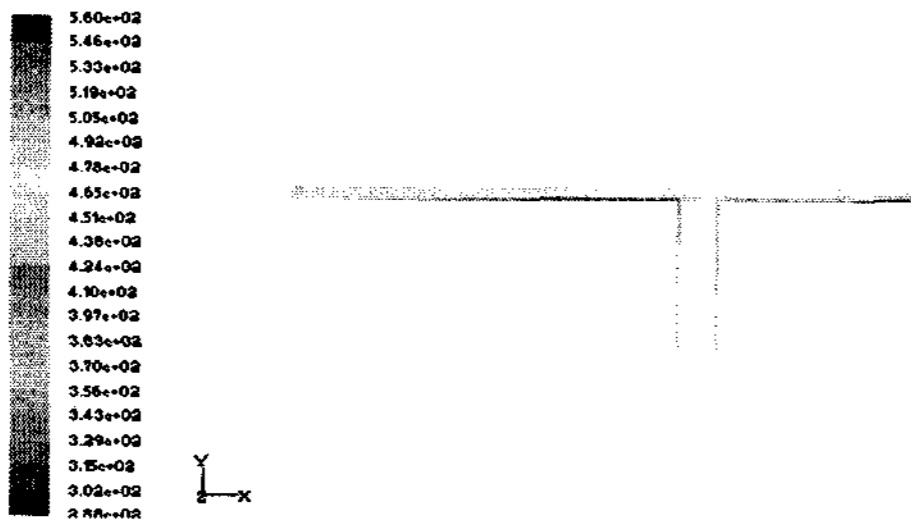


Fig.4. Convection type receiver. Concentration ratio 200, mass flow 0.01 kg/s, inlet T 450K.

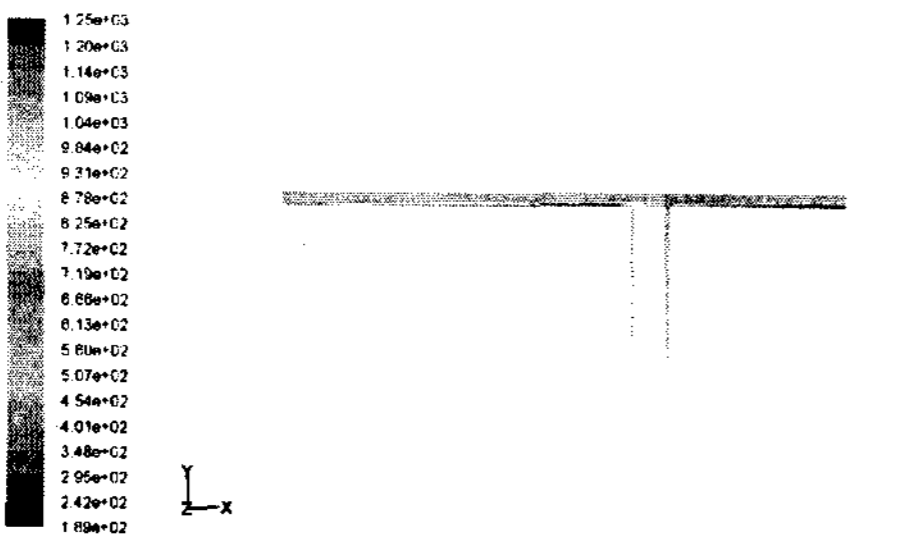


Fig.5. Convection type receiver. Concentration ratio 500, mass flow 0.01 kg/s, inlet T 450K.

Heat pipe식 흡수기 성능

집광비 54에서 히트파이프 내부의 유효열전도율을 3,000 및 10,000 W/m-K로 하였을 때 흡수기의 온도분포는 각각 Figs. 6 및 7과 같이 나타났다.

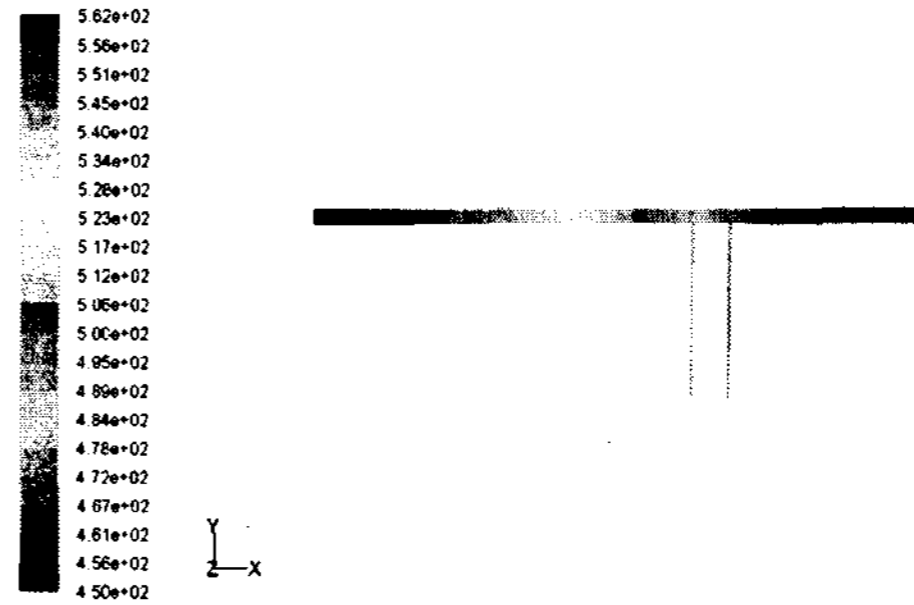


Fig.6. Heat pipe type receiver. Concentration ratio 54, $k_{eff}=3000$ W/m-K.

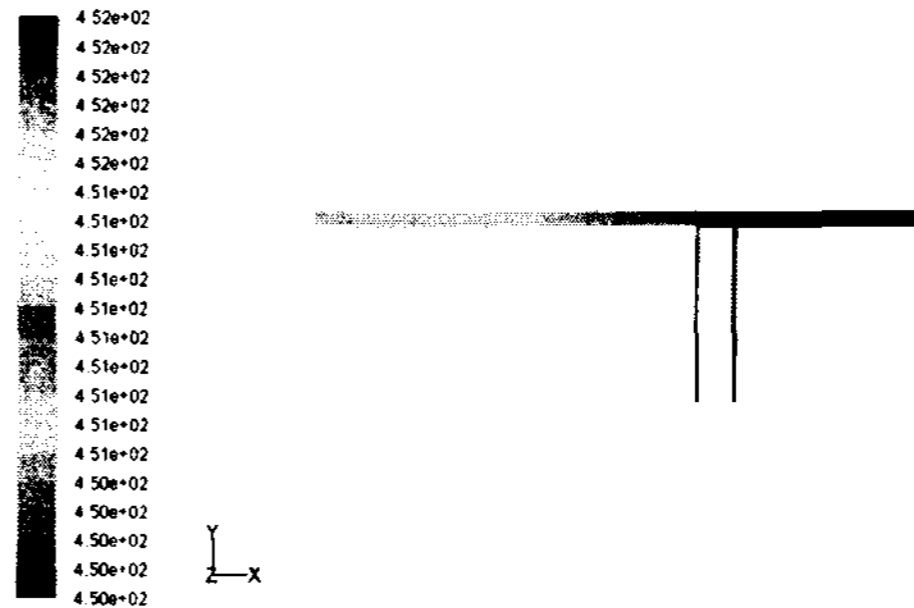


Fig.7. Heat pipe type receiver. Concentration ratio 54, $k_{eff}=10,000$ W/m-K.

집광비가 200 및 500인 경우에도 계산을 수행했으나, 대표적으로 집광비가 1000인 경우 히트파이프식 흡수기의 성능은 유효열전도율을 10,000 W/m-K로 가정하였을 경우에 Figs. 8 및 9와 같이 나타났다.

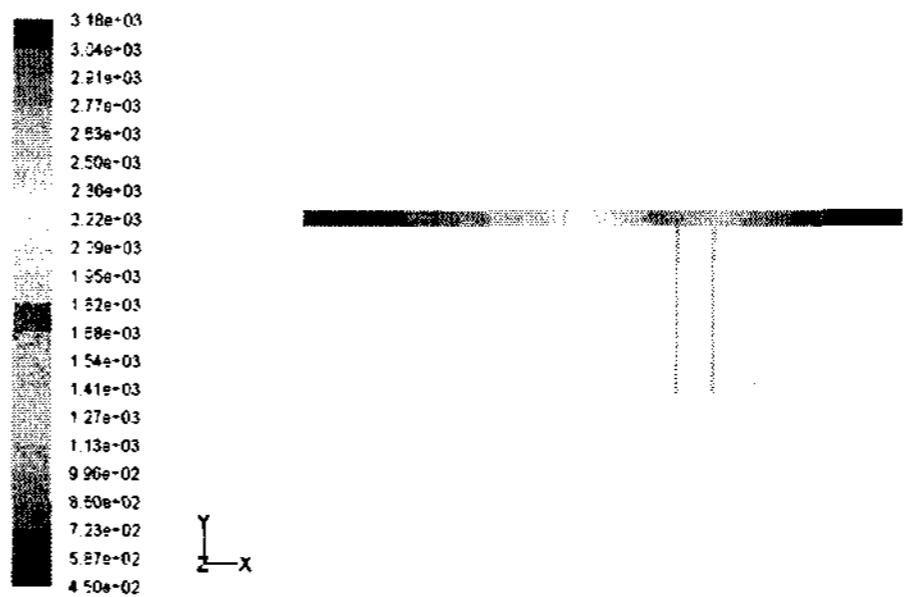


Fig.8. Heat pipe type receiver. Concentration ratio 1000, $k_{eff}=3,000$ W/m-K.

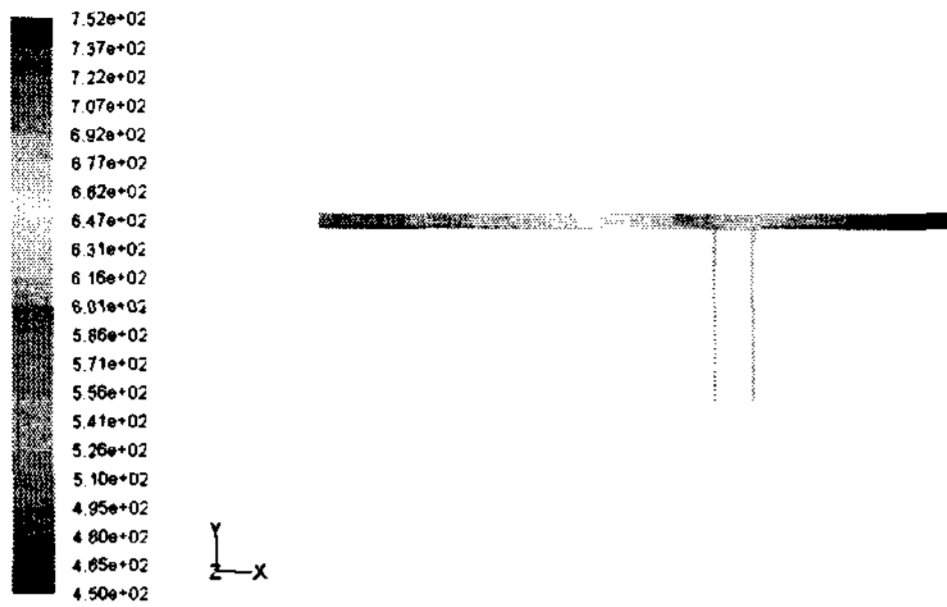


Fig.9. Heat pipe type receiver. Concentration ratio 1000, $k_{eff} = 10,000 \text{ W/m-K}$.

집광비가 54인 경우 강제대류식과 히트파이프식 흡수기의 열적 특성을 외벽의 평균온도로 분석한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 집광비의 값이 작을 경우에는 히트파이프의 유효열전도율이 크지 않으면 등온성의 장점은 잘 나타나지 않은 것으로 파악되었다.

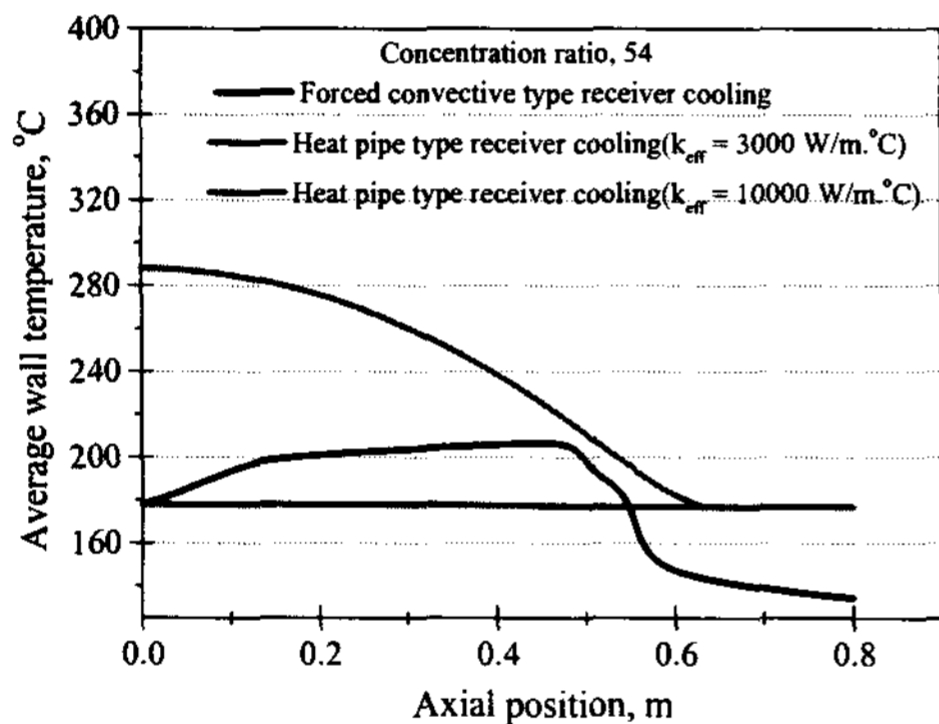


Fig.10. Axial temperature variation at the wall(CR=54)

집광비가 200인 경우 강제대류식과 히트파이프식 흡수기의 열적 특성을 외벽의 평균온도로 분석한 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

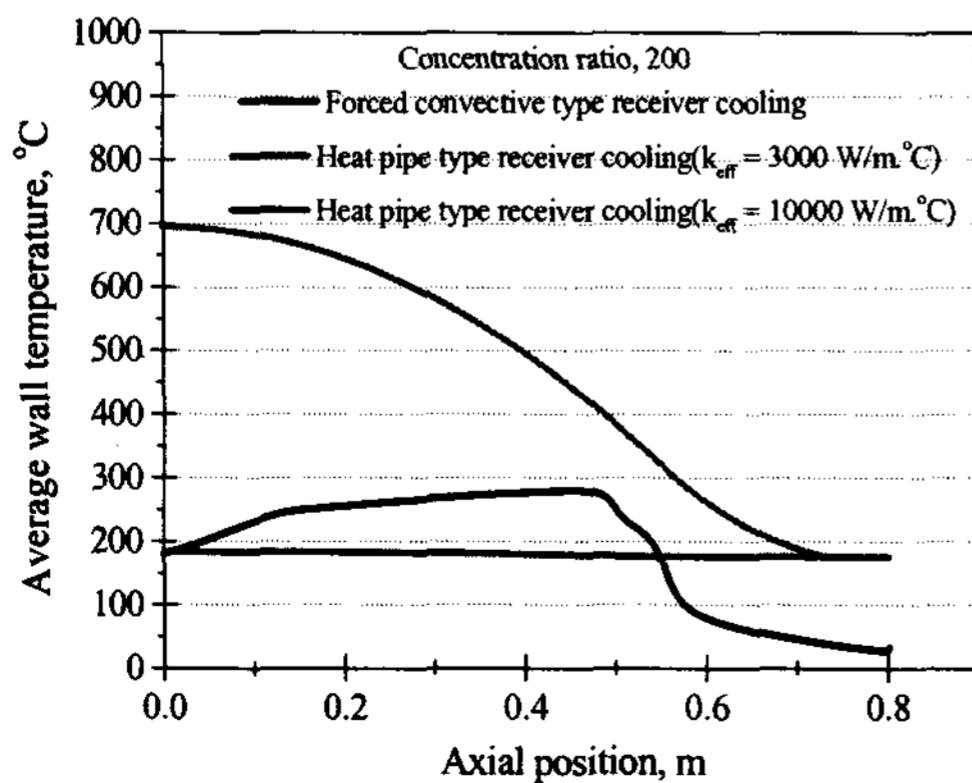


Fig.11. Axial temperature variation at the wall(CR=200)

강제대류식과 히트파이프식 흡수기를 열저항의 관점에서 비교한 결과를 Fig. 12에 요약하였다. 유효열전도율이 10000 W/m-K 이상의 히트파이프 작동에서 흡수기는 강제대류식에 비해 1/4 정도로 열저항이 작게 나타났다.

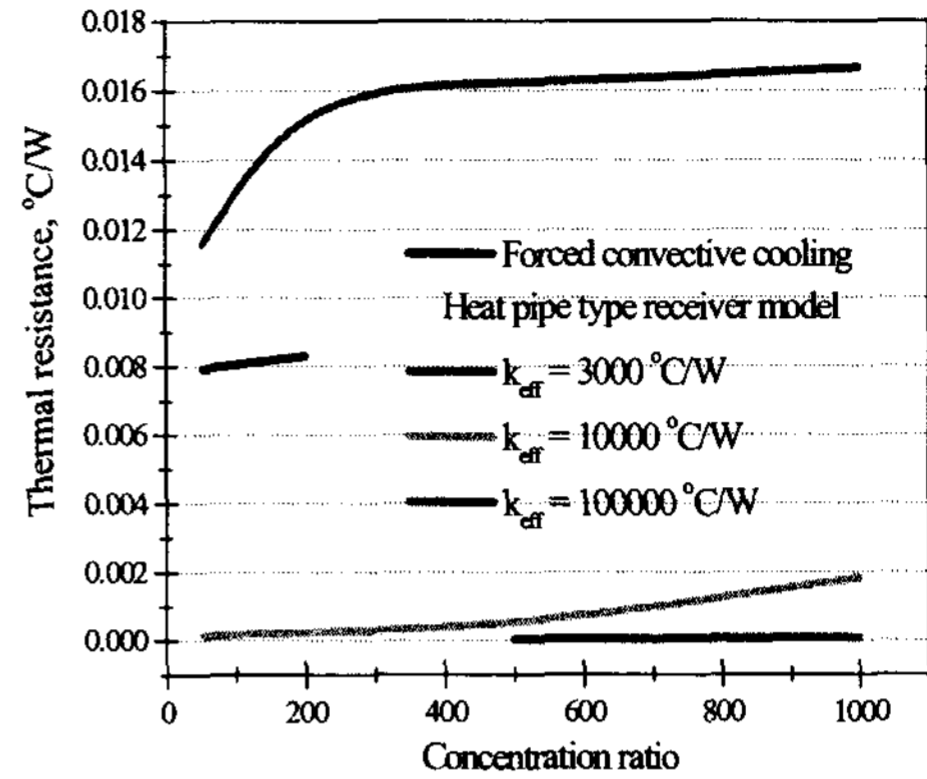


Fig. 12. Thermal resistance of the heat transfer paths in the solar receiver

결론

단순한 구조의 고온 태양열 흡수기 모델에 대하여 용융염을 이용한 강제대류식과 히트파이프식의 온도 특성을 수치적으로 비교하였다.

히트파이프식 흡수기는 유효열전도율이 높게 나타나는 고온범위일수록 강제대류식에 비해 그 등온특성이 우수하고, 열저항이 작게 나타난다. 그러나 흡수기 벽에서의 열전달 면적 증가 등 성능 변수에서 추가적으로 모델과 실제 개선의 여지가 있는 것으로 판단된다.

향후 보다 실제적인 모델을 도입하고, 흡수기 내부의 복사열전달 해석을 추가하여 성능해석을 수행할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Seo J. H., Ma D. S., Kim Y., Kang Y. H., Seo T. B., 2007, "반사경 배치 및 흡수기 형상에 따른 접시형 태양열 집열기의 복사열손실 해석," 한국태양에너지학회 춘계학술발표회 논문집, 04-2007, pp. 3-8.
- (2) Ryu S. Y., Seo T. B., Kang Y. H., 2002, "접시형 태양열 집광시스템용 흡수기의 열손실 해석," 태양에너지, 20권, 3호, 2000, pp61-74.
- (3) Kang M. C., Kim J. S., Kang Y. H., Kim N. J., Yoo S. Y., 2006, "태양열 Hybrid Heat Pipe 흡수기의 설계와 제조특성에 관한 연구," 한국태양에너지학회 춘계학술발표회 논문집, 04-2006, pp. 170-176.